

УДК 669.181

ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ ПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕЙ КУЗБАССА

Нохрина О.И., д.т.н., профессор кафедры металлургии
черных металлов (kafamst@sibsiu.ru)

Рожихина И.Д., д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов

Ходосов И.Е., заведующий лабораториями кафедры металлургии
черных металлов (khodosov@mail.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(054007, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

Аннотация. Приведены результаты исследований процессов получения металлизированных продуктов путем твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд с применением в качестве восстановителей углей разных технологических марок. Представлены результаты высокотемпературных экспериментов по изучению кинетики процессов твердофазного восстановления железа из его оксидов. По результатам исследований определены оптимальные расходы углей, температурные и временные параметры процесса металлизации, необходимые для получения металлизированных материалов с заданными составом и степенью металлизации.

Ключевые слова: железо прямого восстановления, металлизированные материалы, восстановление элементов из оксидов, кинетика восстановления, уголь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-697-703

Металлургические предприятия России при производстве металлоизделий с высокими потребительскими свойствами испытывают недостаток в качественном сырье [1]. Большинство современных марок стали имеют жесткие ограничения по содержанию примесей цветных металлов. В то же время содержание примесей в используемом при плавке ломе неуклонно растет (рис. 1). Перспективным сырьем для производства высококачественных сталей является так называемое

железо прямого восстановления, которое получают путем внедоменного передела железосодержащего сырья [2].

В России и в мире железо прямого восстановления в основном получают с использованием в качестве восстановителя конвертированного природного газа, однако его применение ведет к удорожанию стоимости железа. При этом опережающими темпами развиваются технологии получения железа прямого восстановления

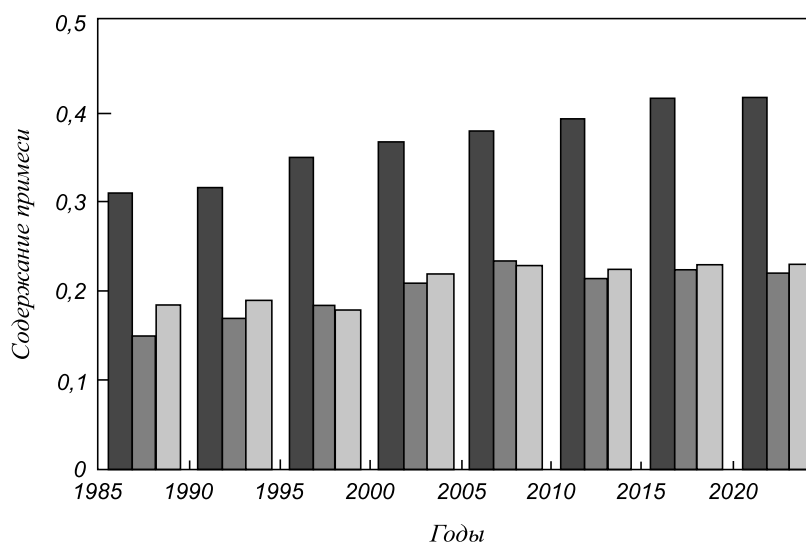


Рис. 1. Динамика накопления меди в ломе

Fig. 1. Accumulation dynamics of copper in waste

с использованием твердых углеродистых восстановителей [3]. Одним из наиболее распространенных таких восстановителей является уголь и продукты его переработки. Запасы углей в России во много раз превышают запасы других видов топлив, а мощности по его добыче значительно опережают спрос традиционного угольного рынка. Таким образом, вовлечение в металлургическое производство угля является весьма актуальным [4, 5].

Процессы твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд с использованием в качестве восстановителя углей не имеют однозначной оценки, что связано с разными физико-химическими свойствами углей, многокомпонентностью системы и одновременным развитием восстановительных реакций с участием твердого углерода и газообразных продуктов [6, 7]. Следует учитывать, что в процессах твердофазного восстановления одновременно развиваются реакции как прямого, так и косвенного восстановления железа из оксидов железных руд [8].

Целью настоящего исследования являлась разработка энергоэффективной технологии получения металлизированных материалов при комплексной переработке железосодержащего сырья и углей [9]. Исследования включали термодинамическое моделирование процессов твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд, проведение высокотемпературных экспериментов, изучение свойств исходных и полученных после металлизации материалов и математическую обработку результатов.

При проведении исследований в качестве железосодержащего сырья использовали железную руду и железорудный концентрат, полученный путем обогащения руды. Фазовый состав исходной железной руды представлен гематитом (Fe_2O_3) – много; присутствует магнетит ($FeO \cdot Fe_2O_3$), гетит ($\alpha-FeOOH$), кварц (SiO_2), каоленит ($Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$); встречается немного хлорида железа, полевого шпата. Химический состав, % (по массе), железной руды (числитель) и железорудного концентрата (знаменатель) представлен ниже:

$Fe_{общ}$	FeO	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5
<u>52,3</u>	<u>20,3</u>	<u>19,15</u>	<u>3,31</u>	<u>0,072</u>
61,2	22,1	7,92	2,41	0,020
CaO	MgO	S	Влага	
<u>0,94</u>	<u>0,76</u>	<u>0,42</u>	<u>5,78</u>	
1,96	2,31	0,41	6,27	

В качестве твердых углеродистых восстановителей применяли коксовую мелочь (КМ) и угли Кузбасса: уголь бурый марки Б2; уголь длиннопламенный марки Д; уголь слабоспекающийся марки СС; уголь тощий марки Т. Выбранные марки углей отличаются физико-химическими характеристиками и условиями метаморфизма [10, 11]. Результаты технического анализа восстановителей приведены ниже:

Восстановитель	Характеристика			
	C_{fix}	A^d	V^{daf}	W^r
Б2	49,1	7,83	42,10	24,7
Д	55,6	5,64	36,20	10,4
СС	70,2	6,41	20,60	6,7
Т	76,3	8,34	9,34	5,1
КМ	84,4	12,3	2,10	1,2

Состав золы восстановителей и элементный их состав представлены следующими данными:

Химический состав, %	Восстановитель				
	Б2	Д	СС	Т	КМ
Fe_2O_3	10,30	8,17	7,40	16,40	13,12
Al_2O_3	5,40	25,60	16,30	25,00	23,72
CaO	45,30	9,70	2,50	5,38	5,15
MgO	5,90	3,70	1,58	1,66	1,76
SiO_2	26,90	50,00	46,60	47,90	47,81
P_2O_5	0,20	1,80	0,37	0,75	0,69
S	0,68	0,61	0,02	0,16	0,02

Элементный анализ на горючую массу, %	Восстановитель				
	Б2	Д	СС	Т	КМ
C^{daf}	70,41	72,02	85,3	90,79	96,97
H^{daf}	3,88	6,12	4,78	3,96	0,56
N^{daf}	0,98	1,74	2,16	2,93	1,42
O^{daf}	22,58	20,12	6,52	2,16	0,56
S^{daf}	1,15	0,34	0,14	0,31	0,51

Условия твердофазного восстановления железа из оксидов руды с применением углей определяли методами термодинамического моделирования. С использованием программного комплекса «TERRA», позволяющего на основе принципа максимума энтропии находить равновесный состав многокомпонентной гетерогенной термодинамической системы для высокотемпературных условий [12, 13].

Термодинамическая система представлена элементами: $H-O-S-N-C-Si-Al-Fe-Ti-Mg-Ca-Na-K$. Из веществ, которые могут быть получены в результате расчетов равновесного состояния, были выбраны значимые, из них в газовой фазе могут присутствовать H_2 , H_2O , H_2S , CO , CO_2 , CH_4 , N_2 ; в конденсированной – C , Fe , FeO , FeS , Fe_3C , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , $MgSiO_3$, $Ca_3P_2O_8$, $CaCO_3$, $CaSiO_3$, $CaTiO_3$, $Na_2Si_2O_5$, $K_2Si_4O_9$.

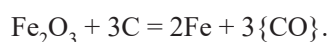
Процессы термического разложения углей исследовали с помощью термического анализатора Setaram LabSys Evo. Методы термогравиметрии позволяют с высокой точностью определять изменение потери массы и при нагреве образца в заданных условиях. Образ-

цы восстановителей нагревали со скоростью 10 К/мин в условиях свободного доступа воздуха.

Составы газов, образующихся при термическом разложении углей, определяли путем нагрева угля в нейтральной атмосфере до температуры 1173 К в лабораторной печи SNOL 02-1250, оборудованной системой отбора и анализа газа.

При изучении кинетики твердофазного восстановления железа из оксидов с использованием угля применяли гравиметрический метод непрерывного взвешивания образца при изотермической выдержке. Согласно данной методике о полноте протекания восстановительных процессов судят по изменению массы образца [14, 15].

Для изучения процессов металлизации были изготовлены брикеты, состоящие из руды и восстановителя (см. вышеприведенные данные). Компоненты предварительно подвергали дроблению и последующему отсеvu нужных фракций, после чего в заданных соотношениях перемешивали и брикетировали. Массовое соотношение между оксидами железа и углеродом в брикетах соответствовало необходимому для полного восстановления железа из оксидов согласно реакции



Брикеты массой 30 г помещали в графитовом тигле в горячую зону печи сопротивления, нагретой до температуры эксперимента, и осуществляли изотермическую выдержку. С помощью электронного регистратора фиксировали убыль массы. В полученных металлизированных материалах методами химического анализа определяли содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$, $\text{Fe}_{\text{мет}}$. Степень и скорость восстановления оценивали по изменению массы и скорости изменения массы брикета [16]. Степень восстановления рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{m_{\text{O}_2}^{\text{del}}}{m_{\text{O}_2}} \cdot 100, \quad (1)$$

где m_{O_2} – количество кислорода в оксидах железа, содержащихся в брикете, г; $m_{\text{O}_2}^{\text{del}}$ – масса кислорода, удаленного из брикета, г.

Массу удаленного кислорода определяли по формуле

$$m_{\text{O}_2}^{\text{del}} = m_{\text{CO}} \frac{M_{\text{O}}}{M_{\text{CO}}} = (\Delta m^{\text{del}} - m^V) \frac{16}{28}; \quad (2)$$

здесь M_{O} и M_{CO} – молярные массы кислорода и монооксида углерода, г/моль; Δm^{del} – убыль массы брикета, %; m^V – потеря массы брикета за счет удаления летучих, содержащихся в восстановителе, и угара графитового тигля.

Скорость восстановления рассчитывали по формуле

$$V_{\alpha} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\tau}, \quad (3)$$

где $\Delta\alpha$ – изменение степени восстановления, %; $\Delta\tau$ – изменение времени, мин.

Степень металлизации полученных материалов рассчитывали согласно формуле [2]:

$$\varphi_{\text{мет}} = \frac{\text{Fe}_{\text{мет}}}{\text{Fe}_{\text{общ}}} \cdot 100, \quad (4)$$

в которой $\varphi_{\text{мет}}$ – степень металлизации, %; $\text{Fe}_{\text{мет}}$ – содержание железа металлического, %; $\text{Fe}_{\text{общ}}$ – содержание железа общего (сумма окисленного и металлического железа), %.

Результаты термодинамического моделирования процессов твердофазного восстановления железа с использованием в качестве восстановителей углей разных технологических марок позволили определить зависимости степени восстановления железа и состава газовой фазы от расхода угля каждой марки (рис. 2). Из данных, приведенных на рис. 2, следует, что необходимое количество угля для полного восстановления железа из 100 кг руды составляет 30, 20 и 20 кг для марок Б2, Д и Т соответственно. Содержание CO , CO_2 , H_2 и H_2O в газовой фазе зависит от расхода угля. При увеличении количества угля в системе начинает накапливаться углерод, в результате чего происходит более резкое увеличение содержания CO и уменьшение CO_2 в газовой фазе (рис. 2). Такие же закономерности можно видеть по изменению содержания водорода и водяного пара в газовой фазе от расхода угля.

Изучение процессов термического разложения углей показало (рис. 3), что процесс протекает в две стадии: стадия I – удаление гигроскопической и коллоидносвязанной влаги; стадия II – резкое изменение массы угля, вызванное выделением продуктов его газификации.

Из полученных данных следует, что стадия II для бурого угля начинается при температуре 443 К, т. е. на 60 К ниже, чем термическое разложение длиннопламенного угля, и на 210 К ниже, чем тощего. Количество газообразных продуктов, выделяющихся при термическом разложении бурого угля, существенно больше, чем при разложении длиннопламенного и тощего. Потеря массы бурого угля составила 90,6 %; длиннопламенного – 84,5 %; тощего – 78,3 %. Процесс термического разложения длиннопламенного угля протекает менее интенсивно в сравнении с процессами, протекаемыми с использованием остальных рассматриваемых марок углей. Положительный тепловой эффект, наблюдаемый у исследуемых углей, связан с окислением углерода и летучих, выделяющихся в процессе термического разложения. Полученные результаты согласуются с данными авторов работ [17, 18].

Составы газов, образующихся при термическом разложении углей марок Б2, Д, СС, Т и коксовой мелочи (КМ), приведены ниже:

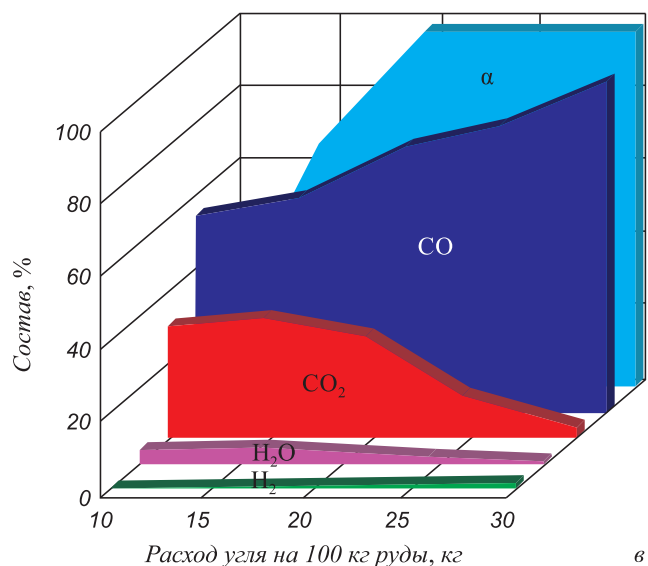
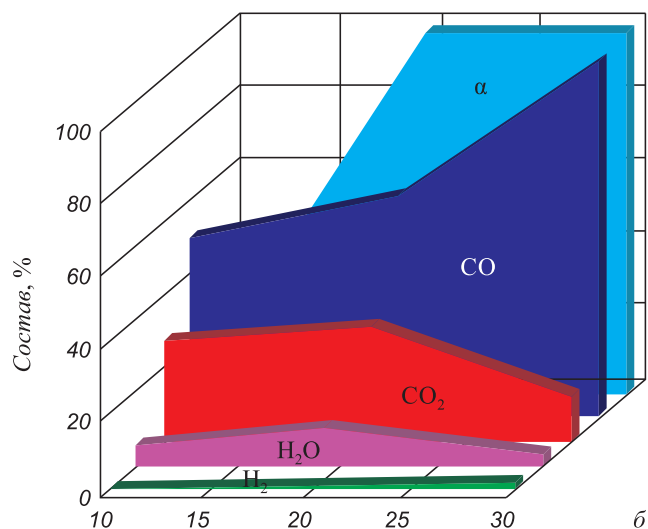
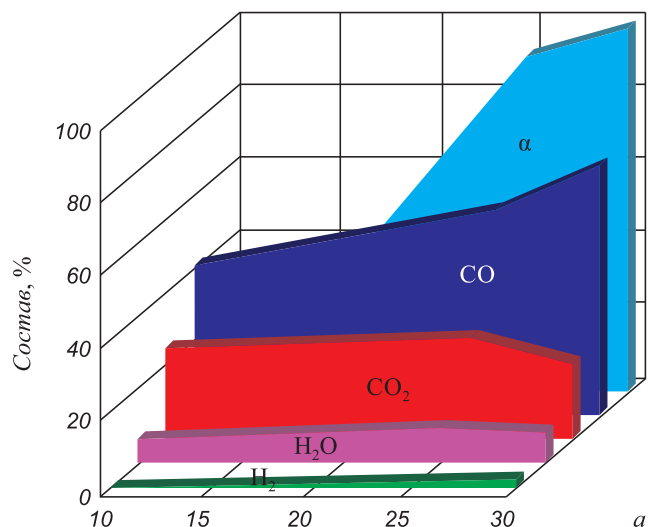


Рис. 2. Результаты термодинамического моделирования – зависимости степени восстановления и состава газовой фазы от количества угля марок: бурого (а); длиннопламенного (б); тощего (е)

Fig. 2. Results of thermodynamic modeling – dependences of reduction degree and composition of gas phase on the quantity of coal of the following grades: brown coal (a); candle coal (b); lean coal (e)

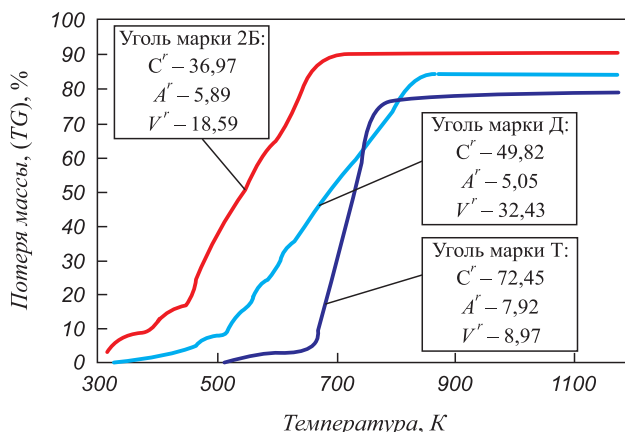


Рис. 3. Изменение массы углей от температуры при нагреве в печи термоанализатора

Fig. 3. Change of coal masses on the temperature when heating in a thermoanalyzer furnace

Восстановитель	Состав газа, %					
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	O ₂	N ₂
Б2	10,21	5,42	67,30	5,90	0,20	–
Д	8,17	12,20	50,24	3,70	1,80	–
СС	3,54	7,15	56,35	3,10	0,50	2,45
Т	1,35	8,26	44,30	2,35	0,50	4,20
КМ	13,12	23,72	5,150	1,76	0,69	–

Анализ газов показал, что газовая фаза углей преимущественно состоит из водорода, наибольшее его количество содержится в газовой фазе бурого угля; наибольшее количество CO содержится в газовой фазе длиннопламенного угля и коксовой мелочи.

Результаты математической обработки экспериментальных данных по изучению кинетики твердофазного восстановления железа из оксидов углями различных марок представлены на рис. 4 и следующими данными:

Восстановитель	Скорость восстановления, %/мин, при температурах, К			
	1173	1273	1373	1473
Б2	0,58	0,74	0,95	1,56
Д	0,51	0,88	1,09	2,48
Т	0,43	0,68	1,15	2,46
КМ	0,35	0,58	0,87	2,12

Из анализа полученных результатов установлено, что при температурах 1173, 1273, 1373 К наблюдается наибольшая скорость восстановления железа при использовании бурого угля, а при температуре 1473 К – при использовании длиннопламенного и тощего углей. Наименьшая скорость восстановления наблюдается при использовании коксовой мелочи.

Результаты химического анализа и расчета степени металлизации показали, что при температурах изотер-

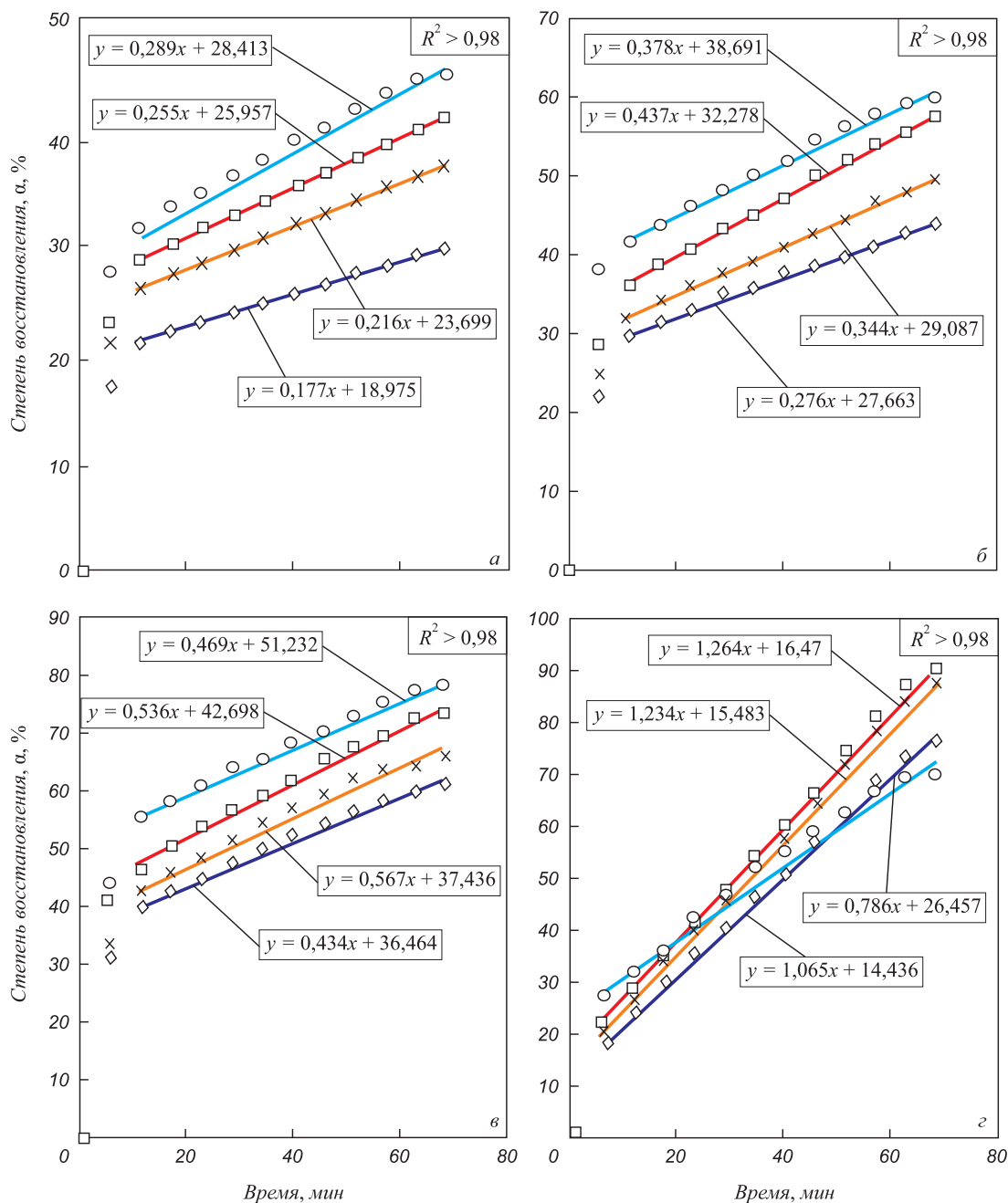


Рис. 4. Результаты изучения кинетики твердофазного восстановления железа из оксидов при температурах 1173 К (а); 1273 К (б); 1373 К (в); 1473 К (г); восстановитель: \diamond – КМ; \times – Т; \square – Д; \circ – Б2

Fig. 4. Results of kinetics of solid-phase reduction of iron from oxides at the temperatures of 1173 K (a); 1273 K (б); 1373 K (в); 1473 K (г); reducing agent: \diamond – КМ; \times – Т; \square – Д; \circ – Б2

мической выдержки 1173, 1273 и 1373 К наибольшее содержание железа и самая высокая степень металлизации наблюдаются у брикетов, составленных с использованием в качестве восстановителя бурого угля. Эти показатели при указанных температурах имеют следующие значения: $Fe_{мет} - 51, 64, 72 \%$, $\phi_{мет} - 76, 87, 92 \%$. При 1473 К показатели снижаются и составляют: $Fe_{мет} - 76 \%$, $\phi_{мет} - 89 \%$. При этой температуре наибольшее содержание $Fe_{мет}$ составляет 80 и 83 %, $\phi_{мет} -$

96 и 98 % имеет место при использовании в качестве восстановителя соответственно тощего и длиннопламенного углей.

Структурный и фазовый анализы показали, что для полученных металлизированных материалов характерна структура с развитым металлическим каркасом. В состав металлизированных материалов входят α -Fe, FeO, стекло и углеродистый остаток. Для материала, полученного при восстановлении брикета, в котором был использован бу-

рый уголь в качестве восстановителя, при температуре восстановления 1473 К определено наличие силикатов железа, что объясняет замедление скорости восстановления (рис. 4, з). Образующиеся жидкоподвижные фазы закупоривают газопроводящие каналы и тем самым замедляют восстановительные процессы. В образовании легкоплавких силикатов железа участвуют оксиды кальция, которые содержатся в золе бурого угля.

Таким образом определено, что протекание процессов твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд с использованием в качестве восстановителей углей разных технологических марок происходит согласно общим закономерностям. Увеличение температуры металлизации приводит к росту скорости протекания восстановительных процессов и, как следствие, – к увеличению содержания металлического железа и степени металлизации рудо-угольных брикетов. Продуктом восстановительного обжига во всех опытах является губчатый материал с развитым в той или иной степени металлическим каркасом [19].

В то же время, как показали эксперименты, при разных температурах металлизации восстановительные свойства углей отличаются, что, вероятно, связано с условиями метаморфизма углей и особенностями протекания процесса термического разложения. Согласно данным работы [20] к числу факторов, определяющих характер процесса разложения угля, относится физическое состояние углерода, в частности размеры и степень совершенства кристаллов графита. Чем больше искажение кристаллической решетки углеродистого восстановителя, тем быстрее происходит процесс его термического разложения. Искаженная кристаллическая решетка наблюдается у молодых углей, например, у бурого угля; наиболее целостная кристаллическая решетка характерна для графита, а для используемых в исследованиях восстановителей – для коксовой мелочи.

Результаты исследований показали, что угли с низкой степенью метаморфизма и высоким содержанием летучих обладают более высокими восстановительными свойствами при твердофазном восстановлении железа из оксидов, при этом для углей с низкой степенью метаморфизма характерно высокое содержание минеральной части, в состав которой входят оксиды кальция. Зольный остаток угля участвует в образовании первичных шлаковых фаз, в результате чего замедляются восстановительные процессы.

Выводы. Результаты исследований показали, что использование углей различных технологических марок при твердофазном восстановлении железа из оксидов железной руды позволяет получать металлизированные продукты заданного состава с высокой (более 95 %) степенью металлизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паршин В.М., Жихарев П.Ю. Сталеплавильное производство: резервы, развитие и повышение эффективности // Сб. трудов

- XIII Международного конгресса сталеплавильщиков. – М.-Полеской: изд. МИСиС, 2014. – 485 с.
2. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. *Металлургия железа*. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
 3. Nobuhiko T. Development of iron-making Technology. Nippon steel technical report. 2012, no. 101, pp. 79–88.
 4. Мазикин В. Итоги работы и перспективы развития угольной отрасли Кузбасса // Уголь. 2010. №5. С. 17 – 19.
 5. Яновский А.Б. О состоянии и мерах по развитию угольной промышленности России // Уголь. 2012. № 8. С. 3 – 10.
 6. Якушевич Н.Ф., Строкина И.В., Полях О.А. Определение параметров окислительно-восстановительных процессов в системе Fe–C–O₂–H₂ // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 8. С. 13 – 18.
 7. Yi Lingyun, Huang Zhucheng, Peng Hu, Jiang Tao. Action rules of H₂ and CO in gas-based direct reduction of iron ore pellets // Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. Vol. 19. pp. 2291 – 2296.
 8. Байков А.А. В сборнике научных трудов АН СССР. – М.: изд. АН СССР, 1948. Т. 2. С. 531 – 546.
 9. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Hodosov I.E. The use of coal in a solid phase reduction of iron oxide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 6. “6th International Scientific Practical Conference on Innovative Technologies and Economics in Engineering”, 2015. p. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012045.
 10. Химия и переработка угля/ Под ред. В.Г. Липовича. – М.: Химия, 1988. – 336с.
 11. Рожихина И.Д., Романенко Ю.Е., Лазаревский П.П., Ходосов И.Е. Альтернативные углеродосодержащие материалы в восстановительных процессах получения марганцевых, хромистых сплавов и металлизированного железа. – В кн.: Металлургия: технологии, управление, инновации, качество. Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции. Под ред. Е.В. Протопопова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2014. С. 128 – 136.
 12. Синярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. – М.: Наука, 1982. – 32 с.
 13. Асанов В.Р., Рошин В.Е., Сенин А.В., Рошин А.В. Термодинамический анализ химических превращений при твердофазной металлизации титаномагнетитовых концентратов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 4. С. 12 – 15.
 14. Амдур А.М., Потапов А.М., Разничина А.Л., Лхамсурен М. Кинетика восстановления железорудного концентрата углем // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 17 – 20.
 15. Yongsheng Sun, Yuexin Han, Peng Gao, Last Guofeng Li / Thermogravimetric study of coal-based reduction of oolitic iron ore: Kinetics and mechanisms // International journal of mineral processing 143. September 2015. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.09.005.
 16. Платонова О.В., Леонович Б.И., Лыкасов А.А. Термодинамика процессов восстановления оксидов железа углеродсодержащими газовыми смесями // Изв. вуз. Черная металлургия. 2003. № 7. С. 3 – 6.
 17. Мизин В.Г., Серов Г.В. Углеродистые восстановители для ферросплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.
 18. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: Справочник / Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шаламанов, А.И. Петров. – М.: Недра, 1994. – 447 с.
 19. Нохрина О.И., Ходосов И.Е. Использование каменных углей при восстановлении железа в твердой фазе. – В сб.: Инновации в материаловедении и металлургии: Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург: изд. УрФУ, 2015. С. 32 – 37.
 20. Гасик М.И. Теория и технология производства ферросплавов. – М.: Металлургия, 1988. – 784 с.

Поступила 3 марта 2016 г.

MANUFACTURE OF METALIZED PRODUCTS WITH THE USAGE OF KUZBASS COALS

O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, I.E. Khodosov

Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk

Abstract. The paper presents the research results of obtaining processes of metalized products by the method of solid-phase iron reduction from oxides of iron ores with the usage of coals of different technological grades as a reducing agent. The authors give the results of high-temperature experiments on the kinetics study of the process of solid-phase iron reduction from its oxides. According to the research results the coal optimum flows have been defined, as well as temperature and time parameters of the metallization process, which are necessary to obtain metalized materials with the specified composition and the metallization degree.

Keywords: direct-reduced iron, metalized materials, element reduction from oxides, reduction kinetics, coal.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-697-703

REFERENCES

1. Parshin V.M., Zhikharev P.Yu. Steel-making production: reserves, development and efficiency increase. In: *Sb. Trudov XIII Mezhdunarodnogo kongressa staleplavil'shchikov* [Collected papers of the XIIIth Int. Congress of steelmakers]. Moscow-Polevskoi: MISiS, 2014, pp. 37–42. (In Russ.).
2. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza* [Iron metallurgy]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2007, 464 p. (In Russ.).
3. Nobuhiko T. Development of iron-making Technology. *Nippon steel technical report*. 2012, no. 101, pp. 79–88.
4. Mazikin V. Work results and perspectives of the development of coal branch in Kuzbass. *Ugol'*. 2010, no. 5, pp. 17–19. (In Russ.).
5. Yanovskii A.B. On the state and measures of the development of coal industry in Russia. *Ugol'*. 2012, no. 8, pp. 3–10. (In Russ.).
6. Yakushevich N.F., Strokina I.V., Polyakh O.A. Parameter determination of oxidation and reduction processes in Fe – C – O₂ – H₂ system. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 8, pp. 13–18. (In Russ.).
7. Yi Lingyun, Huang Zhucheng, Peng Hu, Jiang Tao. Action rules of H₂ and CO in gas-based direct reduction of iron ore pellets. *Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. 2012, vol. 19, pp. 2291–2296.
8. Baikov A.A. In: *Sbornik trudov AN SSSR* [Collected papers of USSR Academy of Sciences]. Moscow: AN SSSR, 1948, vol. 2, pp. 531–546. (In Russ.).
9. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Hodosov I.E. The use of coal in a solid phase reduction of iron oxide. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 6. "6th International Scientific Practical Conference on Innovative Technologies and Economics in Engineering"*, 2015. p. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012045.
10. *Khimiya i pererabotka uglya* [Chemistry and recycling of coal]. Lipovich V.G. ed. Moscow: Khimiya, 1988, 336 p. (In Russ.).
11. Rozhikhina I.D., Romanenko Yu.E., Lazarevskii P.P., Khodosov I.E. Alternative coal-containing materials in the reduction processes of production of metalized iron, manganese and chromium alloys. In:

Metallurgiya: tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo. Trudy XVIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Metallurgy: technologies, management, innovations, quality. Proceedings of the XVIIIth All-Russian theoretical and practical conference]. Protopopov E.V. ed. Novokuznetsk: SibGIU, 2014, pp. 128–136. (In Russ.).

12. Sinyarev G.B., Vatolin N.A., Trusov B.G. *Primenenie EVM dlya termo-dinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh protsessov* [Usage of computers for thermodynamic calculations of metallurgical processes]. Moscow: Nauka, 1982, 32 p. (In Russ.).
13. Asanov V.R., Roshchin V.E., Senin A.V., Roshchin A.V. Chemical transformations thermodynamic analysis at solid-phase metallization of titanium magnetite concentrates. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 4, pp. 12–15. (In Russ.).
14. Amdur A.M., Potapov A.M., Raznitsina A.L., Lkhamsuren M. Reduction kinetics of iron-ore concentrates by coal. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 8, pp. 17–20. (In Russ.).
15. Yongsheng Sun, Yuexin Han, Peng Gao, Last Guofeng Li. Thermogravimetric study of coal-based reduction of oolitic iron ore: Kinetics and mechanisms. *International journal of mineral processing* 143. September 2015. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.09.005.
16. Platonova O.V., Leonovich B.I., Lykasov A.A. Thermodynamics of the reduction processes of iron oxides by carbon-containing gas mixtures. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2003, no. 7, pp. 3–6. (In Russ.).
17. Mizin V.G., Serov G.V. *Uglerodistyie vosstanoviteli dlya ferrosplavov* [Carbon reducing agents for ferrous alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 272 p. (In Russ.).
18. Shtumpf G.G., Ryzhkov Yu.A., Shalamanov V.A., Petrov A.I. *Fiziko-tekhnicheskie svoystva gornyykh porod i uglei Kuznetskogo basseina: Spravochnik* [Physicotechnical properties of rocks and coals of Kuznetsk basin: Reference book]. Moscow: Nedra, 1994, 447 p. (In Russ.).
19. Nokhrina O.I., Khodosov I.E. Usage of black coal when reducing iron in a solid phase. In: *Innovatsii v materialovedenii i metallurgii: Materialy IV Mezhdunarodnoi interaktivnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Collected papers: Innovations in material science and metallurgy: Proceedings of the IVth Int.l interactive theoretical and practical conf.]. Ekaterinburg, 2015, pp. 32–37. (In Russ.).
20. Gasik M.I. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov* [Theory and technology of ferroalloys production]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 784 p. (In Russ.).

Information about the authors:

O.I. Nokhrina, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (kafamst@sibsiu.ru)

I.D. Rozhikhina, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy

I.E. Khodosov, Head of the Laboratory of the Chair of Ferrous Metallurgy (khodosov@mail.ru)

Received March 30, 2016